1980 年坂出・一字爆破地震動観測による 四国東北部の地殻構造

名古屋大学理学部 井 上 公
東京大学地震研究所 浅野 周三・吉井 敏 尅
京都大学防災研究所 松 村 一 男
京都大学理学部 村 上 寛 史
岐阜大学教育学部 佐々木 嘉 三
国土地理院 多 田 堯

(昭和 58 年 12 月 12 日受理)

Crustal Structure in the Northeastern Part of Shikoku, Japan as Derived from Seismic Observations of Sakaide-Itchu Explosions in 1980

Hiroshi INOUE

School of Science, Nagoya University

Shuzo ASANO and Toshikatsu YOSHII

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Kazuo MATSUMURA

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Hiroshi MURAKAMI

Faculty of Science, Kyoto University

Yoshimi SASAKI

Faculty of Education, Gifu University

Takashi TADA

Geographical Survey Institute

(Received December 12, 1983)

Explosion seismic experiments were carried out in 1980 for the investigation of the crustal structure in the northeastern part of Shikoku. Sixty-three seismograms were obtained at 42 temporary stations aligned on the two N-S trending parallel profiles crossing the Median Tectonic Line which is the most prominent geotectonic line and the greatest active fault in Japan. A P-wave velocity structure of the surface and granitic layers was obtained from

the first arrival time data. A structure of the deeper part of the crust was also roughly estimated from the later arrivals. The Median Tectonic Line was estimated to be a north-depressed fault with a vertical offset of up to 2 km in the shallow velocity profile. A possibility of the extension of the offset further downward to the deeper crust is also suggested.

§1. はじめに

四国地方の地殻構造は、爆破地震動研究グループによる 1965 年の外山爆破以来、これまでにいくつかの研究報告がなされてきており、次第にその概要が明らかになりつつある [青木・村松 (1974); HASHIZUME (1977); 市川 (1968); 伊神・他 (1982); 伊藤・他 (1982); 木村 (1979); YOSHII *et al.* (1973)]. これらの研究から、四国地方は、深さ数キロメートルの地殻上部の構造に複雑さがみられ、それらと、西南日本の典型を示す同地域の帯状地質構造との対応に興味をもたれた。

そこで我々は、1979 年から本格的に開始された本州四国連絡橋公団坂出工事事務所による坂出沖での工事用海底爆破の地震動を利用し、特に伊藤・他 (1982) に報告された中央構造線付近の特徴的な地殻構造を更に精度よく求めることを試みた。

測線は坂出沖の爆破点から南方へ、中央構造線を越えて御荷鉾構造線に近い徳島県美馬郡一

Fig. 1. Locations of shot and observation points, and geological provinces. Asterisks are shot points (SK: Sakaide, IC: Itchu), solid circles, observation points, and solid lines, geotectonic lines.

宇村までのぼし、同地点で逆測線用の爆破を行なった。両爆破点を結ぶ直線を主測線とし、さらに、平行して東へ約 5 km 離れた副測線を設け、両測線上で高密度な観測を行なった。また、爆破の観測中に記録された 2, 3 の地震があつたが、その中で 1980 年 2 月 15 日に和歌山市付近で起こつた地震は比較的 S/N が良かったので、参考データとして使用した。Fig. 1 に爆破点、観測点、地質構造区分及び 2 月 15 日の地震の震央を示す。

§ 2. 爆破及び観測

2-1. 坂出爆破

爆破点は坂出沖約 2 km の瀬戸内海の二面島付近の岩礁である。爆破は

1979 年 2 月から 1980 年 10 月までの間に合計 19 回行なわれ、我々はそれらのうちの 1980 年に行なわれた 3 回を観測した。いずれの爆破も昼間に行なわれた。3 回の爆破孔のパターンを Fig. 2 に示す。それぞれの区域の中心を爆破点とし、距離の計算を行なった。爆破時刻の決定は発破母線に電線を巻き、その誘導電流を記録する方法をとり、これは本州四国連絡橋公団に依頼した。爆破点付近の岩質は主に粗粒花崗閃緑岩である。

2-2. 一字爆破

爆破点は一字村川又に設けた。瀬開谷川の河川敷に内径約 10 cm、深さ 33 m の爆破孔を掘削し、耐圧用ダイナマイトを詰めて、深夜爆発させた。薬長は約 15 m であつた。爆破点付近の岩質は主に黒色片岩である。

Table 1 に 3 回の坂出爆破及び一字爆破の時刻、薬量、位置などを示す。

2-3. 観測

観測点は合計 45 点、観測点間隔は平均約 2 km であるが、主・副両測線ともに中央構造線付近はやや密に配置されている。使用した地震計はすべて上下動、固有振動数 2 Hz のもの(マーク・プロダクツ社製 L22-D)で、総合周波数特性は 2~30 Hz でフラットとした。

Fig. 2. Pattern of Sakaide shot points. Dynamite is charged at grid points. I: Sakaide 1 explosion on Feb. 15, 1980. II: Sakaide 2 explosion on Mar. 15, 1980, III: Sakaide 3 explosion on Sep. 8, 1980

Table 1. Shot times, charge sizes and location of shot points.

Name	Shot time						Charge ton	Lat. (N)			Long. (E)			Height m
	Y	M	D	H	M	S		°	'	"	°	'	"	
SAKAIDE (1)	1980	02	15	12	06	05.39	3.00	34	22	05.8	133	49	31.6	0
SAKAIDE (2)	1980	03	15	11	38	34.79	2.70	34	22	05.4	133	49	31.6	0
SAKAIDE (3)	1980	09	08	11	54	20.80	2.24	34	22	06.5	133	49	31.2	0
ITCHU	1980	03	16	01	01	58.17	0.20	33	54	16.1	134	05	35.6	560

Table 2. Location of observation points,

No.	Name	Prof.	Location					
			Lat. (L)			Long. (E)		
1	Mitaniji	M	34°	16'	28.5''	133°	52'	55.3''
2	Hayuka-shimo	M	34	12	50.6	133	54	37.8
3	Nagatani	M	34	12	09.1	133	55	24.9
4	Kubikiri-toge	M	34	10	29.9	133	56	34.7
5	Kawahigashi-shimo	M	34	08	37.6	133	57	34.6
6	Fuchino	M	34	07	30.3	133	58	18.6
7	Myojin	M	34	06	14.6	133	58	56.3
8	Izuriha	M	34	05	48.3	133	58	53.8
9	Hayashi	M	34	06	13.2	133	59	56.3
10	Urimine	M	34	05	08.4	133	59	07.1
11	Ueno	M	34	03	34.0	134	00	15.8
12	Nakagami (N)	M	34	03	16.2	134	00	27.8
13	Nakagami (S)	M	34	03	03.2	134	00	36.7
14	Takenouchi	M	34	02	47.9	134	00	48.5
15	Haseho	M	34	01	36.0	134	01	45.0
16	Soga	M	34	00	20.0	134	01	54.6
17	Aono	M	33	59	37.0	134	02	21.0
18	Joren	M	33	58	38.5	134	02	13.7
19	Sarukai	M S	33	58	33.5	134	04	51.5
20	Akamatsu (1)	M	33	57	13.2	134	03	38.9
21	Akamatsu (2)	M	33	57	21.2	134	03	49.0
22	Toie	M	33	56	37.8	134	03	56.4
23	Kiriu	M S	33	56	58.8	134	05	16.2
24	Taira	M	33	55	11.9	134	03	41.9
25	Ozako	M	33	54	36.5	134	04	16.3
26	Itchu	M S	33	54	16.7	134	05	35.6
27	Sozu	S	34	10	08.5	134	01	48.6
28	Kamikashihara	S	34	09	20.0	134	00	55.5
29	Maenokawa	S	34	07	42.9	134	00	09.3
30	Kawaoku	S	34	06	27.0	134	01	35.4
31	Tachimiyama	S	34	05	19.9	134	03	02.2
32	Nodanoi	S	34	04	34.8	134	03	10.8
33	Sarusaka (1)	S	34	03	46.0	134	03	36.6
34	Tsuchigakubo	S	34	03	30.0	134	03	49.6
35	Nishiyama	S	34	02	01.6	134	03	35.5
36	Noguchi	S	34	01	48.3	134	03	40.7
37	Hirotni	S	34	00	36.2	134	05	42.5
38	Kekamichiue	S	34	00	14.0	134	05	58.2
39	Miyadaira	S	33	59	36.2	134	05	22.8
40	Nagao	S	33	57	25.4	134	07	44.2
41	Kawakami-kage	S	33	54	00.7	134	10	05.5
42	Hainokyu	M	33	45	45.5	134	11	20.2
S1	Shamijima	M	34	20	33.5	133	49	38.9
S2	Tokiwakoen	M	34	18	50.9	133	50	16.3
S3	Fukuecho	M	34	18	06.2	133	52	07.5

Abbreviations

1S: SAKAIDE (1) 2/15, 1980; 2S: SAKAIDE (2) 3/15, 1980; 3S: SAKAIDE (3) 9/8, 1980
 I: ITCHU 3/16, 1980; Eq: Earthquake, 2/15, 1980; M: Main Profile; S: Sub Profile;
 A, B, C, L: Quality of Data (see footnote in Table 3); —: not observed; A*: Shot point;

quality of data and observers.

Observed Data						Observers	
H	1 S	2 S	3 S	I	Eq		
75m	—	A	—	C	—	DRI	S. Matsuo, K. Nishigami
140	—	A	—	—	—	DRI	K. Matsumura
165	A	—	—	C	C	DRI	K. Matsumura
250	—	A	—	—	—	DRI	N. Hurukawa, K. Taniguchi, K. Mino
275	—	A	—	B	C	DRI	K. Watanabe, N. Hurukawa
300	—	A	—	—	—	NGY	I. Yamada
355	—	A	—	A	—	NGY	M. Ukawa, H. Inoue
430	—	A	—	—	—	NGY	M. Kobayashi
455	—	A	—	—	—	NGY	M. Yamada
460	A	—	—	—	C	NGY	M. Kobayashi
290	A	—	—	A	L	KOB	T. Sakamoto, GIF M. Watanabe
165	—	A	—	—	C	GIF	M. Watanabe
135	A	—	—	—	—	GIF	Y. Sasaki
90	—	A	—	B	—	GIF	M. Ogawa
130	A	—	—	—	C	ERI	T. Yoshii
210	—	A	—	A	—	ERI	T. Yoshii
250	A	—	—	—	—	ERI	M. Yanagisawa
310	—	—	—	A	—	ERI	M. Saka
210	A	—	—	—	C	ERI	Y. Ichinose
430	—	A	—	—	—	KOB	K. Tanaka, T. Takahashi
520	—	—	—	A	—	KOB	K. Tanaka
280	A	—	—	—	C	ERI	K. Miura
460	—	A	—	A	—	KOB	T. Sakamoto, T. Terashima
400	—	—	—	A	—	ERI	K. Miura
460	—	L	—	A	—	ERI	S. Asano, K. Miura
570	—	B	—	A*	—	ERI	S. Asano, Y. Ichinose
300	—	A	—	C	—	KYT	Y. Iio, H. Murakami, A. Nakagawa
317	—	A	—	L	—	KYT	H. Murakami, Y. Iio, A. Nakagawa
380	A	—	—	A	C	NGY	I. Yamada
570	A	—	—	A	C	NGY	T. Okuda, M. Yamada
480	A	—	—	A	C	KOB	K. Tanaka, GIF Y. Sasaki
395	—	A	—	A	—	GIF	Y. Sasaki
150	A	—	—	A	C	KOB	K. Sato, GIF H. Fujioka
100	—	A	—	—	—	GIF	H. Fujioka
130	A	—	—	—	C	ERI	M. Saka
100	—	B	—	A	—	GSI	T. Tada
180	A	—	—	—	C	ERI	S. Asano
240	—	A	—	A	—	KCH	S. Kimura
130	—	A	—	A	—	KOB	K. Sato, T. Terashima
315	A	—	—	—	—	KYT	Y. Iio, I. Saida, H. Murakami
448	B	—	—	—	B	KYT	H. Murakami, I. Saida, Y. Iio
400	B	—	—	—	B	KCH	S. Kimura
5	—	—	A	—	—	KYT	H. Murakami
105	—	—	A	—	—	GIF	Y. Sasaki
83	—	—	A	—	—	DRI	K. Matsumura

DRI: Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ; ERI: Earthquake Research Institute, University of Tokyo; GIF: Faculty of Education, Gifu Univ.; GSI: Geographical Survey Institute KCH: Faculty of Science, Kochi Univ.; KOB: Faculty of Science, Kobe Univ.; KYT: Faculty of Science, Kyoto Univ.; NGY: School of Science, Nagoya Univ.

Table 3. Travel time data for the Sakaide (1) explosion.

Station No.	Station Name	Shot Distance km	Azimuth °	D/6 s	First Arrival			Later Arrival					
					T1-O s	T1-O-D/6 s	T2-O s	T2-O-D/6 s	T3-O s	T3-O-D/6 s	T4-O s	T4-O-D/6 s	
3	NAGATANI	20.48	153.8	3.41	3.76A +	0.35	6.80	3.39					
29	MAENOKAWA	31.19	148.4	5.20	5.69A +	0.49	8.54B -	3.34					
30	KAWAOKU	34.35	147.3	5.73	6.30A +	0.57	7.83C +	2.10					
31	TACHIMIYAMA	37.29	146.1	6.21	6.81A +	0.60	7.99C +	1.78	9.21C +	3.00			
10	URIMINE	34.63	154.8	5.77	6.42A +	0.65							
33	SARUSAKA (1)	40.20	147.4	6.70	7.32A +	0.62	9.21C -	2.51	13.15	6.45			
11	UENO	38.02	154.2	6.34	6.99A +	0.65	12.17	5.83					
13	NAKAGAMI (S)	39.10	154.1	6.52	7.10A +	0.58	12.79	6.27					
35	NISHIYAMA	42.93	149.7	7.15	7.56A +	0.41	13.09	5.94					
15	HASEHO	42.29	153.6	7.05	7.43A +	0.38	8.44C +	1.39	9.69B -	2.64			
37	HIROTANI	46.87	147.9	7.81	8.14A +	0.33	10.22B -	2.41					
17	AONO	45.99	154.6	7.67	8.10A +	0.43	10.03B +	2.36					
19	SALUKAI	49.48	151.5	8.25	8.65A +	0.40							
40	NAGAO	53.51	148.4	8.92	9.31A +	0.39	10.91C +	1.99	13.65B -	4.73	15.94	7.02	
22	TOIE	52.03	154.7	8.67	9.13A +	0.46	15.93	7.26					
41	KAWAKAMI-KAGE	60.78	148.6	10.13	10.58B +	0.45							
42	HAJINOKYU	75.09	153.4	12.51	13.17B +	0.66							
*	KCY	50.49	144.6	8.42	8.79 +	0.37							
*	WJK	84.99	131.4	14.17	14.56 +	0.39							
*	KMN	78.28	145.4	13.05	13.77 +	0.72							
*	SHIRATORI	45.27	117.1	7.55	7.94A +	0.39							

*: not used in the present analysis. Accuracies of the data are, A: within ± 0.01 s, B: within ± 0.03 s, C: within ± 0.1 s, and L: first onset is prior to the reading. Polarities are, +: upward ground motion, and -: downward ground motion.

Table 4. Travel time data for the Sakaide (2) explosion. Explanations are the same as in Table 3.

Station No.	Station Name	Shot Distance km	Azimuth °	D/6 s	First Arrival		Later Arrival						
					T1-O s	T1-O-D/6 s	T2-O s	T2-O-D/6 s	T3-O s	T3-O-D/6 s	T4-O s	T4-O-D/6 s	
1	MITANUJI	11.61	153.3	1.93	2.22A +	0.29							
2	HAYUKA-SHIMO	18.80	155.4	3.13	3.46A +	0.33	5.25C +	2.12	6.23	3.10			
4	KUBIKIRI-TOGE	24.01	153.2	4.00	4.32A +	0.32							
27	SOZU	29.04	139.5	4.84	5.20A +	0.36	7.16B +	2.32	11.73	6.89			
28	KAMIKASHIHARA	29.36	143.4	4.89	5.26A +	0.37	9.08	4.19					
5	KAWAHIGASHI-SHIMO	27.79	153.6	4.63	5.02A +	0.39	9.05	4.42					
6	FUCHINO	30.15	153.4	5.02	5.51A +	0.49	9.96	4.94					
7	MYOJIN	32.66	153.7	5.44	6.01A +	0.57	10.93	5.49					
9	HAYASHI	33.41	151.4	5.57	6.15A +	0.58	9.10B	3.53	11.29	5.72			
8	IZURIHA	33.37	154.4	5.56	6.17A +	0.61	8.76C	3.20					
32	NODANOI	38.57	147.0	6.43	7.02A +	0.59							
34	TSUCHIGAKUBO	40.78	147.4	6.80	7.32A +	0.52	13.31	6.51					
12	NAKAGAMI (N)	38.63	154.2	6.44	7.01A +	0.57	12.51	6.07					
14	TAKENOUCI	39.65	154.0	6.61	7.19A +	0.58	8.31C -	1.70	12.85	6.24			
36	NOGUCHI	43.34	149.8	7.22	7.57B +	0.35	9.47B -	2.25					
16	SOGA	44.49	154.6	7.42	7.83A +	0.41	9.93C +	2.51					
38	KEKAMICHIUE	47.65	147.9	7.94	8.29A +	0.35	14.95	7.01					
39	MIYADAIRA	48.18	149.6	8.03	8.45A +	0.42							
20	AKAMATSU (1)	50.84	154.7	8.47	8.96A +	0.49	10.65B -	2.18	11.80C -	3.33			
23	KIRIU	52.34	152.4	8.72	9.17A +	0.45	13.46C +	4.74	16.13	7.41			
26	ITCHU	57.04	154.3	9.51	9.95B +	0.44	13.18C -	3.67	17.57	8.06			
*	ISI	67.72	120.4	11.29	11.74	0.45							
*	KCY	50.48	144.6	8.41	8.76 +	0.35							
*	WJK	84.98	131.4	14.16	14.71 -	0.55							
*	KMN	78.27	145.4	13.05	13.73B +	0.68							

Table 5. Travel time data for the Sakaide (3) explosion. Explanations are the same as in Table 3.

Station No.	Station Name	Shot		D/6	First Arrival	
		Distance km	Azimuth		T1-O _s	T1-O-D/6 _s
S1	SHAMIJIMA	2.87	176.1	0.48	0.63A+	0.15
S2	TOKIWAKOEN	6.14	169.2	1.02	1.28A+	0.26
S3	FUKUECHO	8.41	151.6	1.40	1.65A+	0.25

また、一字爆破点近傍では表層速度のデータを得るために、固有振動数 4 Hz の地震計を約 500 m 間に 4 点設置して観測を行なった。

§3. 観測結果

それぞれの観測点で得られた記録から、初動及び後続波の着震時を読み取った。読み取り値の精度は、A, B, C, L の 4 段階にランク分けした。A は ± 0.01 秒以内、B は ± 0.03 秒以内、C は ± 0.1 秒以内、L は遅くともその時刻には地震波が到来していることを意味する。今回の初動の読み取り値の約 9 割が A ランクであつた。Table 2 に観測点のリスト、Table 3~6 に 4 回の爆破で得られた走時を示す。Fig. 3~6 は主・副それぞれの正逆計 4 測線のレコードセクションである。過去の四国地方での爆破実験と同様、今回も明瞭な後続波が観測されている。Fig. 7~10 は初動の走時のみをプロットしたもので、坂出爆破では中央構造線の北側約 10 km の区間で走時に遅れの生じていることが特徴的である。Fig. 11 には一字爆破点近傍の初動走時図を示す。

§4. 地殻構造

初動の走時図 (Fig. 7~10) において、坂出爆破については距離 5 km 以遠、一字爆破については 20 km 以遠が、いわゆる 6 km/s 層からの屈折波であると思われる。そこで 2 層構造を仮定してタイムターム法で構造を求め、更に第 3 層以深の構造は後続波から推定することとした。

4-1. 表 層

坂出爆破点付近の表層速度を示すデータは一点のみではあるが、その値は 4.6 km/s と求めた (Fig. 7)。過去にも坂出爆破は何回か観測されているが、いずれも近距離の記録は無く、これが唯一のデータである。一字爆破点では Fig. 11 に示すように 3.9 km/s の値が得られたが、これはごく近傍のみで、その先約 20 km までの初動は 5.0 km/s の直達波とみなせる (Fig. 8, Fig. 10)。従つて、この値が一字付近の表層速度である。これは、同じ三波川帯で得られた市川 (1968) の結果とほぼ一致する。

表層速度は測線に沿つてかなり変化する可能性があるが、詳しいデータがないので、両端で得られた値の平均をとつて 4.8 km/s とし構造モデルを求めた。なお、この値は伊藤・他 (1982) で用いられた値と同じである。

Table 6. Travel time data for the Itchu explosion. Explanations are the same as in Table 3.

Station No.	Station Name	Shot Distance km	Azimuth	D/6	First Arrival		Later Arrival				
					T1-O s	T1-O-T/6 s	T2-O s	T2-O-D/6 s	T3-O s	T3-O-D/6 s	T4-O s
1	MITANIJ	45.44	334.7	7.57	12.10C -	4.53					
3	NAGATANI	36.58	334.7	6.10	6.62C +	0.52	8.53C +	2.43	11.40C -	5.30	
27	SOZU	29.91	348.8	4.99	5.62C +	0.63	5.91C -	0.92			
28	KAMIKASHIHARA	28.76	345.6	4.79	5.42L -	0.63	6.09C +	1.30	9.62	4.83	
5	KAWAHIGASHI-										
	SHIMO	29.27	335.1	4.88	5.55B +	0.67	7.87B +	2.99	9.47C	4.59	
29	MAENOKAWA	26.23	341.4	4.37	5.02A +	0.65	5.48C	1.11	7.43C +	3.06	
30	KAWAOKU	23.35	344.7	3.89	4.54A +	0.65	6.83B -	2.94	7.87	3.98	
7	MYOJIN	24.39	335.2	4.06	4.71A +	0.65	7.03B -	2.87	8.03	3.97	
31	TACHIMIYAMA	20.83	349.1	3.47	4.08A +	0.61	7.33	3.86			
32	NODANOI	19.42	349.0	3.24	3.85A +	0.61	5.15C -	1.91			
33	SARUSAKA (1)	17.82	350.1	2.97	3.57A +	0.60	5.02C -	2.05	6.18	3.21	
11	UENO	19.05	334.5	3.18	3.72A +	0.55					
14	TAKENOUCHI	17.40	335.0	2.90	3.50B +	0.60	6.03	3.13			
36	NOGUCHI	14.24	348.1	2.37	2.83A +	0.46	3.22B -	0.85	4.71C +	2.34	
16	SOGA	12.57	333.2	2.09	2.51A +	0.42	4.26	2.17			
38	KEKAMICHUE	11.04	3.0	1.84	2.22A +	0.38	3.90	2.06			
39	MIYADAIRA	9.87	358.1	1.64	1.98A +	0.34	3.35	1.71			
18	JOREN	9.60	327.3	1.60	1.90A +	0.30	3.39	1.79			
21	AKAMATSU (2)	6.33	334.4	1.05	1.30A +	0.25	2.26	1.21			
23	KIRIU	5.04	354.3	0.84	1.03A +	0.19	1.83	0.99			
24	TAIRA	3.39	300.5	0.57	0.66A +	0.09	0.98	0.41			
25	OZAKO	2.13	287.2	0.36	0.42A +	0.06	0.80	0.44			
*	KCY	11.22	23.8	1.87	2.25 +	0.38					
*	KMN	23.62	123.6	3.94	4.39B +	0.45					

Table 7. Travel time date for the earthquake on Feb. 15, 1980. Explanations are the same as in Table 3.

Station No.	Station Name	Shot Distance km	Azimuth	D/6	First Arrival	
					T1-O _s	T1-O-D/6 _s
3	NAGATANI	122.03	285.6	20.34	20.41	0.07
4	KUBIKIRI-TOGE	119.55	284.5	19.92		
5	KAWAHIGASHI-SHIMO	117.27	283.0	19.54	19.86	0.32
29	MAENOKAWA	113.04	282.6	18.84	19.19	0.35
30	KAWAOKU	110.42	281.6	18.40	18.86	0.46
31	TACHIMIYAMA	107.85	280.8	17.97	18.30	0.33
10	URIMINE	113.73	280.1	18.95	19.19	0.24
33	SARUSAKA (1)	106.51	279.3	17.75	18.09	0.34
11	UENO	111.55	278.7	18.59	19.16L	0.57
12	NAKAGAMI (N)	111.17	278.5	18.53	19.05	0.52
13	NAKAGAMI (S)	110.89	278.3	18.48		
35	NISHIYAMA	106.10	277.6	17.68	17.68	-0.00
15	HASEHO	108.82	277.0	18.14	18.16	0.02
37	HIROTANI	102.57	276.4	17.10	16.98	-0.12
17	AONO	107.55	275.1	17.92		
19	SARUKAI	103.56	274.2	17.26	17.11	-0.15
40	NAGAO	99.02	273.2	16.50		
22	TOIE	104.82	272.2	17.47	17.43	-0.04
41	KAWAKAMI-KAGE	95.31	269.5	15.88	16.05	0.17
42	HAINOKYU	94.92	260.2	15.82	16.10	0.28

Fig. 3. Record section of the Sakaide explosions along the main profile. Triangles indicate later arrivals. Station codes are the same as in Table 2.

Fig. 4. Record section of the Itchu explosion along the main profile. Explanations are the same as in Fig. 3.

Fig. 5. Record section of the Sakaide explosions along the sub profile. Explanations are the same as in Fig. 3.

4-2. 第 2 層

第 2 層からの屈折波とみなされるデータをタイムターム法で解くと、速度は 5.8 km/s となり、境界面は坂出爆破点のみが急に浅くなり地表から出てしまうような解が求まる。また、中央構造線の北側約 10 km の区間は、走時図からもすぐわかるように深い凹状構造となるので、

Fig. 6. Record section of the Itchu explosion along the sub profile. Explanations are the same as in Fig. 3.

Fig. 7. Reduced travel time plots for the Sakaide explosions along the main profile. Double circles and open circles indicate the accuracies of onsets within $\pm 0.01s$ and $\pm 0.03s$, respectively. Dotted line indicates the location of the Median Tectonic Line.

オフセットディスタンスによる誤差を無視できないであろう。そこで、坂出爆破のデータと一字爆破のデータを独立に扱って構造を推定することにした。

まず、走時図及び地質図から、坂出付近はごく一般的な構造が予想されるので、原点走時の1/2である0.12秒を坂出爆破点のタイムタームとする。次に、坂出爆破が一字爆破点で観測されているため、第2層速度を仮定すれば、それに応じて各観測点での坂出爆破によるタイムタームと一字爆破によるタイムタームとが決まる。オフセットディスタンスを考慮して、凹状構造の底で両爆破によるタイムタームが合うように、第2層の速度として5.9km/sの値

Fig. 8. Reduced travel time plots for the Itchu explosion along the main profile. Solid circles indicate the accuracy of onsets within ± 0.1 s. Other explanations are the same as in Fig. 7.

Fig. 9. Reduced travel time plots for the Sakaide explosions along the sub profile. Explanations are the same as in Figs. 7 and 8.

が採用された。

こうして得られた主、副測線のタイムタームをそれぞれ Fig. 12, 13 に、また構造を Fig. 14 上部, Fig. 15 に示す。どちらの測線も中央構造線の近傍で坂出爆破、一字爆破によるタイムタームにくい違いが見られるが、それらは断層付近に速度の小さな堆積物があれば説明がつく。また、中央構造線下には約 2km の北落ち段差が認められる。副測線もほぼ同じ構造で、この程度の測線間隔では有意な差は見出せないことがわかった。

4-3. 第 3 層以深

第 3 層以深の構造は後続波から推定する。Fig. 16, 17 に読み取った後続波の走時図を示す。まず、両爆破ともに見掛け速度の遅い走時の並びが見られる。坂出爆破では 3.5 km/s を示し、これは第 2 層からの屈折波と解釈できる。初動の場合と同じように、距離 30~40 km の区間でいくぶん遅れているのがわかる。一字爆破では見掛け速度 2.9 km/s の波が原点走時は

Fig. 10. Reduced travel time plots for the Itchu explosion along the sub profile. $\lrcorner$ means that the first onset might be prior to the reading. Other explanations are the same as in Figs. 7, 8 and 9.

Fig. 11. Travel time plots for the Itchu explosion in the vicinity of the shot point. Symbols are the same as in Fig. 7.

ば 0 秒で並んでいる。これは直達 S 波であろう。S 波はこれら以外にも記録されているはずであるが、同定はできない。

後続 P 波の走時は、両爆破とも 2 列に並んでいるように見える。到着時の遅い方のものは比較的明瞭だが、早い方はあまりはつきりしない。いずれも見掛け速度は 7 km/s を越えている。これらは第 3、第 4 層からの反射波と考えることができる。そこで遅い側の明瞭な方をコンラッドからの、また早い側はその上の境界面からの反射波と解釈した。第 3 層、第 4 層の速度は求められないので、それぞれ伊藤

・他 (1982) により得られている 6.1, 6.8 km/s の値を仮定して、走時に合うような境界面の位置、傾きを求めた。結果は Fig. 14 下部に示す。走時の精度から推測される構造の任意性は陰をつけて示した。第 3 層がはつきりとした層として存在するかどうかは今後の資料による検討が望まれる。

§ 5. 検 討

はじめに述べたように、爆破の観測中に和歌山市付近で起こった地震が記録された。地震研究所和歌山微小地震観測所の観測網によれば、この地震は

Fig. 12. Time Terms along the main profile. Open circles: for the Sakaide explosions, solid circles: for the Itchu explosion.

Fig. 13. Time Terms along the sub profile. Symbols are the same as in Fig. 12.

Fig. 14. Crustal structure along the main profile. Deep part is for both main and sub profiles. Symbols are the same as in Fig. 12. Double hatched area is expected to consist of low velocity sediments. Dotted areas are the possible range of the boundaries.

Fig. 15. Crustal structure along the sub profile. Explanations are the same as in Fig. 14.

発震時: 1980 年 2 月 15 日 12 時 18 分 23.66 秒

震央: $33^{\circ}54'44.5''N$, $135^{\circ}11'55.6''E$, 深さ: 7 km

マグニチュード: 2.2

である。Table 6 にこの震源要素による走時表を示す。Fig. 18 にレコードセクションを、Fig. 19 に初動の走時図を示す。平均的な見掛け速度は 6 km/s 程度で、中央構造線の南北で約 0.5 秒の走時差があり、その傾向は先に求めた構造から予想されるものと一致する。震央

Fig. 16. Later arrivals for the Sakaide explosions along the main and sub profiles. Solid lines show travel time curves of S-waves and two reflected waves. Symbols are the same as in Fig. 7.

Fig. 17. Later arrivals for the Itchu explosion. Explanations are the same as in Fig. 16.

距離と震源の深さから考えると、これらの初動がどの層を伝播してきたものかは不明確であるが、仮に今回得られた 5.9 km/s 層からの波とすれば、その走時差 0.5 秒は我々の得たタイムターム差 0.3 秒に比べて大きすぎる。従つてこれらは更に下層からの波で、その層にも段差が存在することを示唆する。

四国地方に於ける過去の爆破地震動観測によれば、同地域の上部地殻の速度は 6.0 km/s [青木・村松 (1974); 市川 (1968)], 6.1 km/s [伊藤・他 (1982); 木村 (1979)], 四国沖で 6.1 km/s [YOSHII *et al.* 1973], また坂出爆破の片測線の見掛け速度として、 6.1 km/s [伊神・

Fig. 18. Record section of the earthquake which occurred on Feb. 15, 1980.

Fig. 19. Reduced travel time plots for the earthquake on Feb. 15, 1980. Open circles: for the main profile, solid circles: for the sub profile. Stippled line indicates the location of the Median Tectonic Line for each profile.

他 (1982); HASHIZUME (1976)] となっており, 我々の得た値 5.9 km/s は, それらのどれよりも小さい. これら四国地方全域にわたつての速度の違いを, 異方性や深さ方向のゆるやかな速度増加のみによつて説明することは困難であり, 地域性がかなり影響していると思われる. 伊藤・他 (1982) は, 中央構造線の南北でのタイムタム差が 0.5 秒あり, 南側の三波川帯で 6.1 km/s 層が地表近くまで達していることを報告している. 市川 (1968) 及び今回の結果から見て, そのような浅い所に 6.1 km/s 層があるとは思えないが, 0.5 秒のタイムタム差は我々の得た 0.3 秒より大きい事, 及び第 2 層速度が我々の得た 5.9 km/s よりも大きい事を考え合せると, この地域では深さ 5 km 前後に 6.1 km/s 層があるか或いは $5.9 \sim 6.1 \text{ km/s}$ の速度増加があり, 中央構造線による段差がその深さまで及んでいることが想像される. この可能性は, 先に自然地震の走時からも言えたことである. また, 伊藤・他 (1982), 及び我々の結果とともに後続波の解釈からではあるが, 深さ $10 \sim 20 \text{ km}$ の地殻中部に北下りの構造を得ており, 中央構造線の影響がその深さまで及んでいる可能性を示唆している.

Fig. 20. Maximum velocity amplitudes (p-p) as a function of epicentral distances. Open circles: for the main profile in the Sakaide explosions, solid circles: for the sub profile in the Sakaide explosions, open triangles: for the main profile in the Itchu explosion, solid triangles: for the sub profile in the Itchu explosion.

爆破地震動の最大振幅を距離に対してプロットしたものを Fig. 20 に示す. ほとんどの記録は初動を含む部分が最大振幅を与えている. 坂出, 一字両爆破ともに, 距離のおよそ 2.5 乗に比例して減衰しており, そのパターンには構造を反映した複雑さが見られる.

四国地方に於ける稠密な重力測定は国土地理院により行なわれている. それによると, 坂出, 一字測線上でのブーゲー異常は Fig. 21 のようになっている. このパターンは我々の得た速度構造と調和的である. 中央構造線の南北での重力差, 約 16 mgal と, 我々の得た速度構造の段差約 2 km から計算される第 1 層と第 2 層の密度差は約 0.16 g/cm^3 となり, これは 4.8, 5.9 km/s の速度差に対しては常識的な値である.

今回の解析では表層速度を測線全域にわたって一様と仮定した. しかし実際に得られた値は, 坂出付近で 4.6 km/s, 一字付近で 5.0 km/s とくい違っている. それらが測線に沿って変化している事は十分あり得よう. そこで第 2 層上面に凹凸がなくても, 表層速度を考えられる範囲で変化させることによって走時を説明できるか否かを検討する. 測線が大きく分けて 3

つの地質区分にまたがっている事に着目し, 表層を 3 つのブロックに分けた単純なモデルで走時合わせを行なった. 北のブロックは主に花崗岩から成る領家帯で, 速度は 4.6 km/s, 南のブロックは主に結晶片岩から成る三波川帯で速度は 5.0 km/s とした. 中央のブロックは主に砂岩, 泥岩等から成る和泉帯で, 過去にも爆破実験は行なわれておらず, 速度は不明であるが, 同じ中生代の堆積物である四万十帯については, 中部地方で 4.4 km/s [地質調査所 (1978)], 四国地方で 4.8 km/s [木村 (1978)] が得られているので, 和泉帯も恐らく 4~5 km/s と思われる. そこで, いちばん小さく見積つて 4.0 km/s としてみた. このモデル及びその走時曲線と, 高度を補正した観測走時を Fig. 22 に示す. 中央のブロックによる走時の遅れは, 平均するとまだ不足気味であり, 更にこのブロックの底面は下に凸になつていなければ走時のパターンに合わない. 従つて, 和泉帯における表層の厚さは, やはりその両側に比べ

Fig. 21. Bouguer anomalies along the main profile. Vertical lines are error bars.

Fig. 22. Crustal model with separate surface velocities and without irregularity in the boundary between the surface and the second layers (bottom). Calculated travel time curves for the model (solid lines) and height corrected observed travel time data (open circles) of main and sub profiles. (top: for the Itchu explosion, middle: for the Sakaide explosions.)

て深くなっているであろう。しかしその正確な深さは速度が決まらないとはつきりしない。

§6. ま と め

坂出沖及び一字村に於ける爆破による地震動の観測から、四国東北部の地殻構造が以下のようになり明らかとなった。

1. 表層速度は坂出付近で 4.6 km/s, 一字付近で 5.0 km/s.
2. 第 2 層速度は 5.9 km/s.
3. 第 2 層上面の深さは、表層速度を一様に 4.8 km/s と仮定すれば、坂出付近で約 1 km, 中央構造線北側約 10 km の区間で約 3 km, 一字付近で約 1.5 km であり、中央構造線

を境に約 2 km の北落ち段差がある。

4. 主, 副両測線の間には有意な構造の違いは見出せない。

これらの結果は付近に発生した自然地震の走時や重力測定 of 資料とも調和的である。今後、測線中央部、和泉帯に於ける第 2 層上面の深さを正確に決定するために、和泉帯の表層速度を調べる事が必要である。また、地表の物質境界である中央構造線が、地殻内の速度構造にどの深さまで影響しているか、さらにそれが、この構造線に沿つてどのように変化するかを知ることが将来の課題である。

謝 辞

本研究は、本州四国連絡橋公団坂出工事事務所による連絡橋建設工事のための海底爆破を利用しておこなわれた。爆破情報の連絡、爆破時刻の測定、測量結果、爆破方法などの必要資料の提供などについて、多大の協力を坂出工事事務所から賜つた。杉田秀夫所長はじめ関係職員の皆様、特に直接連絡に当つて下さつた奥川淳志氏に深く感謝致します。

徳島県美馬郡一宇村役場西尾宗吉総務課長には、爆破点選定について協力を賜つた。また徳島県協町土木事務所維持管理課には、瀬開谷川河川敷における爆破作業許可について協力いただいた。徳島県生活環境部消防防災課には、夜間爆破を含めて、爆破の許可について協力を賜つた。徳島県警察本部には、火薬輸送、爆破点付近の警備などについて協力いただいた。これらの機関または個人に、記して謝意を表します。

爆破孔掘削と爆破作業補助を請負つていただいた株式会社上田組には、他の面でも種々協力を賜つた。厚く御礼申し上げます。

京都大学理学部徳島微小地震観測所からは常時及び臨時観測の貴重な資料を提供していただいた。東京大学地震研究所和歌山微小地震観測所には、1980 年 2 月 15 日 12 時 18 分の地震の震源データを提供していただいた。深く謝意を表します。一宇における爆破作業と観測を担当された東京大学地震研究所、一ノ瀬洋一郎技官、爆破地震動観測に参加され、貴重なデータを提供して下さい下さつた方々、および有益な議論を賜つた爆破地震動研究グループの方々に深く感謝致します。

なお、本研究は昭和 54, 55 年度総合研究 (A) によつて実施することができた。記して謝意を表します。

文 献

- 青木治三・村松郁栄, 1974 御母衣・外山測線に沿う近畿・四国地方の地殻構造, 地震 2, 27, 104-109.
- 爆破地震動研究グループ, 1974, 四国外山爆破による地震動の観測, 地震 2, 27, 95-103.
- 地質調査所, 1978, 静岡県西部地域の地下構造, 地震予知連絡会会報, 19, 103-106.
- HASHIZUME, M., 1977, A Seismic Wave Velocity Along the Sambagawa Metamorphic Belt in Shikoku Area, Southwest Japan, J. Phys. Earth, 25, 91-101.
- 市川金徳, 1968, 四国大歩危周辺地震探査について, 地調月報, 19, 385-395.
- 伊神 輝, 伊藤 潔, 佐々木嘉三, 浅野周二, 1982, 1975 年 3 月坂出沖爆破地震動観測による四国の地殻構造, 地震 2, 35, 367-375.
- 伊藤 潔, 吉井敏尅, 浅野周三, 佐々木嘉三, 伊神 輝, 1982, 家島・島形山爆破地震動による四国地域の地殻構造, 地震 2, 35, 377-391.
- 木村昌三, 1979, 四国地方の地殻構造, 地震 2, 32, 39-340.

国土地理院, 1980, 四国地方のブーゲー異常図, 国土地理院内部資料.

YOSHII, T., W. J. LUDWIG, N. DEN, S. MURAUCHI, M. EWING, H. HOTTA, P. BUHL, T. ASANUMA,
and N. SAKAJIRI, 1973, Structure of Southwest Japan Margin of Shikoku, J. Geophys.
Res., **78**, 2517-2525.